ایجاد لایه کامپوزیتی Fe/TiC بر سطح فولاد کربنی با استفاده از فرایند جوشکاری قوسی با الکترود پوشش‌دار*[۱]

اسماعیل ملایی نژاد[۱]	محمود فاضل نجف آبادی[۲]	ابراهیم کرمیان[۳]

چکیده

در این پژوهش جوشکاری قوسی با الکترود پوشش دار و مخلوط گرافیت و فرو تیتانیم برای ایجاد درجای کامپوزیت سطحی Fe/TiC بر سطح فولاد AISI 1045 بکار رفت. ترمودینامیک واکنش‌های محتمل بررسی شده و اثر ترکیب شیمیایی واکنش دهنده‌ها بر سختی و ریزساختار کامپوزیت حاصله بررسی شد. نتایج نشان داد، بیشترین ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم در نمونه با نسبت وزنی گرافیت به فرو تیتانیم ۱۸ به ۸۲ بدست آمده است. سختی سنجی نشان داد، سختی این کامپوزیت سطحی ۲۲۰٪ نسبت به زیرلایه تقویت نشده افزایش یافته و از ۲۲۰ ویکرز به ۷۱۲ ویکرز رسیده است.

واژه‌های کلیدی کامپوزیت سطحی Fe/TiC ، فولاد AISI 1045 ، جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود پوشش‌دار، ریز ساختار

Fabrication of Fe/TiC Surface Composite on Carbon Steel Using SMAW Process

E. Mollaie Nejad	M. Fazel Najafabadi	E. Karamian

Abstract

In this research, SMAW process and mixture of graphite and ferrotitanium compounds were employed to in-situ fabricating of Fe/TiC composite on the surface of AISI 1045 steel. Thermodynamics of possible reaction and effects of chemical composition of primary reactant were studied. Results showed that maximum size and volume ratio of TiC reinforced particles was achieved in sample with graphite to ferrotitanium ratio of 18 to 82 that shows maximum hardness. Obtained composite`s hardness was increased 220 per cent in relates to un-reinforced sub-layer (220 to 712 Vickers).

Keywords Fe/TiC Surface Composite, AISI 1045 steel, SMAW, Microstructure

---

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۵/۱۰/۹ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۶/۲/۱۲ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استادیار، گروه مهندسی مکانیک، بخش فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، اصفهان.	Email: fazel@pnu.ac.ir

(۳) استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد.

DOI: 10.22067/ma.v30i2.61441

مقدمه

کامپوزیت سازی یکی از روشهای بهبود خواص مکانیکی قطعات است. در این میان ذرات تقویت کننده سرامیکی کاربید تیتانیم به دلیل سختی زیاد، پایداری حرارتی و مقاومت به اکسیداسیون بالا در ساخت کامپوزیت های زمینه فولادی مورد توجه هستند[1]. روش‌های پوشش دهی متداول مانند رسوب دهی شیمیایی بخار (CVD) و رسوب دهی فیزیکی بخار (PVD) به دلیل ایجاد پوشش‌های غالبا نازک، در کاربردهایی که نیاز به ضخامت بالای پوشش دارند مناسب نیستند [2]. به‌علاوه، این فرایندها از نقاط ضعفی مانند هزینه‌های بالا، پیچیدگی فرایند و عدم امکان استفاده برای قطعات بزرگ و نقاط خارج از دسترس برخوردارند [2]. روش‌های پوشش دهی با استفاده از جوشکاری به دلیل سادگی فرآیند و هزینه کمتر بسیار مورد توجه هستند [2]. از سوی دیگر، نتایج تحقیقات نشان داده است، ذرات تقویت‌کننده ساخته شده در حالت درجا دارای اندازه کوچکتر و پراکندگی یکنواخت‌تر نسبت به ذرات تولیدی به روش‌های غیر درجا هستند[3]. بنابراین باعث همسانگردی خواص کامپوزیت تولیدی به این شیوه می‌گردد.گزارش شده است که می‌توان ذرات کاربید تیتانیم را به صورت درجا در حوضچه جوش ایجاد کرد [4].فرایند جوشکاری ذوبی با استفاده از پرتو الکترونی نیز به‌منظور ساخت کامپوزیت های سطحی استفاده شده است. در این رابطه لی و همکاران کامپوزیت سطحی حاوی ذرات TiC را بر سطح فولاد زنگ نزن ۳۰۴ ایجاد کردند[5]. نتایج ایشان نشان داد که، تولید ذرات تقویت کننده TiC بصورت درجا از مخلوط پودری تیتانیم و گرافیت، روش بسیار مناسب‌تری از نظر توزیع ذرات و سختی پوشش ایجاد شده در مقایسه با افزودن این ذرات بطور غیر درجا به مذاب است[5]. در همین پژوهش با استفاده از نمودار فازی سیستم سه تایی Fe-Ti-C نشان داده شد که امکان رسوب فاز TiC از مذاب در حین انجماد حوضچه جوش وجود دارد[5]. در پژوهش دیگری امامیان و همکاران با استفاده از لیزر، کامپوزیت حاوی ذرات TiC را بر سطح فولاد AISI 1030 ایجاد کردند. بر طبق نتایج ایشان با افزایش نسبت کربن به تیتانیم در پودر اولیه، مقدار ذرات کاربید تیتانیم تولیدی افزایش پیدا کرده و در نتیجه سختی لایه کامپوزیتی حاصله نیز افزایش پیدا می‌کند [6]. گزارش شده روش‌های جوشکاری قوس الکتریکی به‌منظور ساخت کامپوزیت‌های سطحی به علت سادگی فرایند و هزینه تجهیزات کمتر، نسبت به فرایند های لیزر و پرتو الکترونی برای کاربرد های صنعتی مناسب‌تر هستند [2]. در این رابطه ژینهونگ و همکاران ایجاد درجای کامپوزیت سطحی FeCrBSi/TiC بر روی فولاد AISI 1045 به روش جوشکاری قوسی تنگستنی با گاز محافظ را بررسی کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد، می‌توان ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم را از واکنش بین گرافیت و تیتانیم در حوضچه جوش ایجاد نمود [1]. در همین رابطه، وانگ و همکاران در مورد ایجاد کامپوزیت Fe/TiC بر سطح فولاد AISI 1045 طی فرآیند روش جوشکاری قوسی تنگستنی با گاز محافظ تحقیق کردند. مخلوط پودری مورد استفاده در تحقیق آنها شامل فروتیتانیم و گرافیت بود. نتایج این پژوهش نشان داد، ذرات کاربید تیتانیم از واکنش مستقیم بین فروتیتانیم و گرافیت در حوضچه جوش فرایند روش جوشکاری قوسی تنگستنی با گاز محافظ ایجاد می‌گردد. این محققین اعلام کردند، سختی لایه ایجاد شده تا ٤ برابر زیرلایه افزایش پیدا خواهد کرد [4]. روش جوشکاری با الکترود پوشش‌دار (SMAW) فرایند متداول جوشکاری بوده و به دلیل سادگی فرایند و تجهیزات ارزانتر نسبت به سایر روش‌ها مورد توجه است. اما این فرایند کمتر برای کامپوزیت سازی مورد بررسی پژوهشگران بوده است.

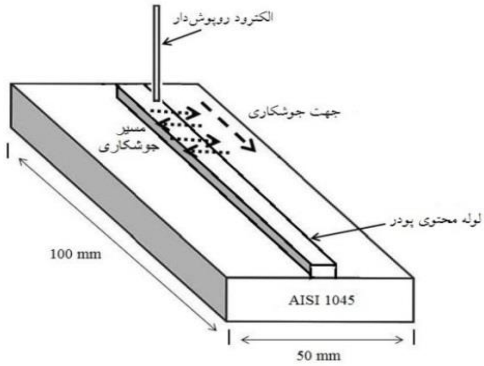
در پژوهش حاضر از فرآیند جوشکاری با الکترود پوشش دار به منظور ساخت کامپوزیت سطحی Fe/TiC بطور درجا بر سطح فولاد AISI 1045 استفاده گردیده است. در همین رابطه، ترمودینامیک واکنش‌های مرتبط بررسی و اثر ترکیب شیمیایی پودر اولیه بر سختی و ریزساختار کامپوزیت حاصله مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش فولاد AISI 1045 با ابعاد ۸×۵۰×۱۰۰ میلیمتر به عنوان زیرلایه استفاده شد. مخلوط پودرهای میکرونیزه فروتیتانیم و گرافیت (با خلوص ۹۹/۹٪) به عنوان مواد واکنش دهنده و از لوله‌های فولاد AISI 1005 با قطر داخلی

٤ میلیمتر و قطر خارجی ۵ میلیمتر به عنوان نگهداره مخلوط پودرهای واکنش دهنده استفاده شد. ترکیب شیمیایی این مواد در جدول (۱) ارائه شده است. همچنین از الکترود AWS A5.1: E7018 با ضخامت ۳/۲۵ میلیمتر به‌منظور جوشکاری سطحی نمونه‌ها استفاده شد. پودر فروتیتانیم و گرافیت با سه نسبت مختلف طبق جدول (۲) مخلوط گردید. مخلوط پودری حاصله با استفاده از آسیاب گلوله ای پرانرژی و تحت اتمسفر خنثی آرگون به مدت ۳ ساعت و با سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه تحت آسیاب کاری قرار گرفت. سپس پودر در لوله هایی از جنس فولاد AISI 1005 ریخته شد. مقدار متوسط پودر در رابطه با واحد طول لوله ها تقریباً ۰/۵ گرم بر سانتیمتر اندازه‌گیری شد. جهت افزایش فشردگی پودر، افزایش احتمال واکنش‌های مورد نظر و حذف هوا، لوله‌ها با استفاده از پرس فشرده شدند. فرایند جوشکاری سطحی منجر به ایجادکامپوزیت درجا با استفاده از الکترود پوشش‌دار بر روی نمونه ها انجام شد. جهت کاهش رقت و با توجه به نوع الکترود مورد استفاده، قطبیت و نوع جریان مستقیم با الکترود در قطب مثبت انتخاب شد. شدت جریان با توجه به قطر الکترود مصرفی برابر با ۱۲۰ آمپر و سرعت متوسط جوشکاری برابر با ۱ میلیمتر بر ثانیه انتخاب شد. شکل (۱) چگونگی عملیات کامپوزیت سازی به روش جوشکاری با استفاده از الکترود پوشش‌دار را نشان می‌دهد.

جهت بررسی ریزساختار نمونه‌ها، از مقطع عرضی آنها، نمونه‌هایی به ابعاد ۸×۲۰×۳۰ میلیمتر توسط وایرکات برش داده شده و متالوگرافی بر روی آن صورت گرفت. نمونه ها با استفاده از محلول نایتال ۳ درصد حکاکی شد. بررسی ریزساختاری پوشش به دست آمده با استفاده از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل TESCAN Vega3 مجهز به طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس انجام شد. برای تعیین درصد حجمی و متوسط اندازه ذرات تقویت کننده، نرم‌افزار ImagJ مورد استفاده قرار گرفت. شناسایی فازهای پوشش ایجاد شده و سرباره حاصل حین فرآیند با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) مدل Philips PW3040 با لامپ پرتو ایکس K_α =۱/۵٤Å انجام شد.



شکل ۱ چگونگی انجام عملیات کامپوزیت سازی سطحی با استفاده از فرایند SMAW

جدول ۱ ترکیب شیمیایی مواد مورد استفاده

ماده	ترکیب شیمیایی (wt%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ti	Fe
AISI 1045	۰/٤٤۵	۰/۲۱٦	۰/۵۲۸	۰/۰۱۱	۰/۰۱۳	–	بقیه
AISI 1005	۰/۰۵۰	۰/۰٤٤	۰/۲۱۲	۰/۰۱٤	۰/۰۱٦	–	بقیه
FeTi	≤۰/۱	–	–	≤۰/۰۲	≤۰/۰۰۲	۷۰	بقیه

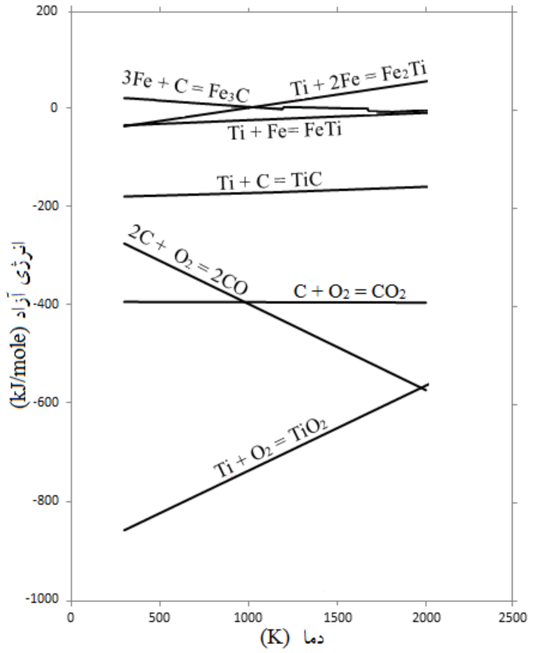
جدول ۲ ترکیب شیمیایی مخلوط پودری اولیه

نمونه	نسبت اتمی C:Ti	FeTi (wt%)	C (wt%)
۱	٤۵ : ۵۵	۸۷	۱۳
۲	۵۰ : ۵۰	۸۵	۱۵
۳	۵۵: ٤۵	۸۲	۱۸

نتایج و بحث

بررسی ترمودینامیک واکنش های محتمل. در ابتدا با توجه به داده های ترمودینامیکی به بحث در مورد شرایط و امکان تشکیل کاربید تیتانیم در فرآیند تحت بررسی پرداخته می‌شود. در جدول (۳) روابط تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش‌های تشکیل اکسید تیتانیم(TiO_2)، کاربید تیتانیم (TiC)، فروتیتانیم(Fe_2Ti و FeTi) سمنتیت (Fe_3C)، مونو اکسید کربن(CO) و دی‌اکسید کربن (CO_2) آورده شده است. به منظور مقایسه بهتر، نمودارهای مربوط به این روابط، در شکل (۲) و در گستره دمایی ۲۰۰۰–۲۹۸ کلوین رسم شده اند.

همانطور که در شکل (۲) دیده می‌شود تغییرات انرژی آزاد گیبس تشکیل کاربید تیتانیم در مقایسه با مقادیر مربوط به تشکیل Fe_3C، Fe_2Ti و FeTi منفی تر است. به بیان دیگر تیتانیم تمایل شدیدی در مقایسه با آهن برای تشکیل کاربید دارد. در نتیجه تیتانیم این قابلیت را دارد که در صورت فراهم شدن انرژی اکتیواسیون مورد نیاز در واکنش با کربن، کاربید تیتانیم تولید کند. گزارش شده است که حداقل دمای لازم برای تشکیل کاربید تیتانیم برابر با ۱٤٤۸ کلوین است [11]. همچنین مقدار انرژی اکتیواسیون برای انجام واکنش تولید کاربید تیتانیم برابر با E_a= ۲۵۸۵/۵ kJ/mole گزارش شده است [12]. با توجه به این که دمای حوضچه جوش بسیار بیشتر از این مقدار بوده و قوس الکتریکی توانایی فراهم نمودن انرژی اکتیواسیون مورد نیاز را دارد، می‌توان نتیجه گرفت که این واکنش از نظر ترمودینامیکی در شرایط این تحقیق انجام پذیر است[13].



شکل ۲ تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش های محتمل

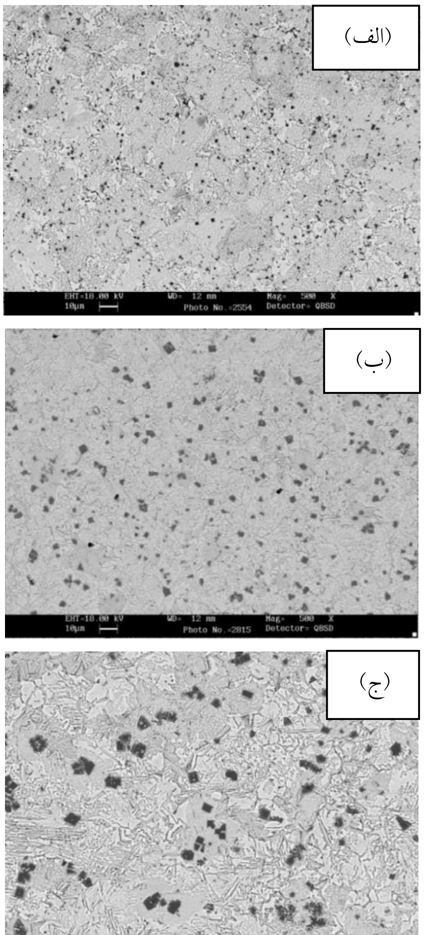
جدول ۳ تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش های محتمل

ردیف	واکنش	انرژی آزاد (J/mole)	گستره دمایی (K)
۱	Ti + C = TiC [7]	− ۱۸۳۰۵۰ + ۱۰/۰۹ T	۲۹۸ – ۱۱۵۵
		− ۱۸۶۶۰۶ + ۱۳/۲۲ T	۱۱۵۵ – ۲۰۰۰
۲	$3Fe + C = Fe_3C$ [۸]	۲۶۳٤۱ − ۲۱/۳٦ T	۲۹۸ – ٤٦۳
		۲۷٦۰۳ − ۲۵/۵۰ T	٤٦۳ – ۱۱۸٤
		۱۲۰۹٦ − ۸/٤٦ T	۱۱۸٤ – ۱٦٦۵
		۷۱۷۱ − ۸/٤٦ T	۱٦٦۵ – ۱۸۰۹
		− ۳۹۸۱۰ + ۱۷/۵۱ T	۱۸۰۹ – ۳۰۰۰
۳	$Ti + 2Fe = Fe_2Ti$ [9]	− ۵۳۳۰۰ + ۵۳/۷ T	۲۹۸ – ۲۰۰۰
٤	Ti + Fe= FeTi [9]	− ۳۹۸۲۲ + ۱٤/۹ T	۲۹۸ – ۲۰۰۰
۵	$Ti + O_2 = TiO_2$ [۱۰]	− ۹۱۰۰۰۰ + ۱۷۳ T	۲۹۸ – ۲۰۸۰
٦	$2C + O_2 = 2CO$ [۱۰]	− ۲۲۳٤۰۰ − ۱۷۵/۳ T	۲۹۸ – ۲۰۰۰
۷	$C + O_2 = CO_2$ [7]	− ۳۹٤۱۳۳ − ۰/۸٤ T	۲۹۸ – ۲۰۰۰

علاوه بر دما، اکتیویته کربن نیز در رخداد واکنش‌های درجا بررسی شده است. بر اساس گزارش‌های منتشر شده، با کاهش مقدار تیتانیم در حوضچه جوش و کاهش اکتیویته آن امکان ایجاد Fe_3C بوجود می‌آید [14]. نمودار تغییرات انرژی آزاد گیبس تشکیل TiO_2 در شکل (۲)، نشان می‌دهد از نظر ترمودینامیکی این ترکیب در مقایسه با کاربید تیتانیم پایدارتر است. بنابراین احتمال اکسید شدن تیتانیم در حضور اکسیژن بسیار بالا خواهد بود. لذا در صورت وجود مقدار بسیار کمی اکسیژن در محیط، تیتانیم سریعاً اکسید شده و کاربید تیتانیم تولید نخواهد شد. بنابراین در هنگام عملیات کامپوزیت سازی این فلز باید از تماس با اکسیژن محافظت شود. با توجه به اینکه گازهای حاصل از الکترود پوشش‌دار توانایی ایجاد محافظت کافی از تیتانیم موجود در مخلوط پودری اولیه را ندارد، در این پژوهش از لوله های فولادی جهت حفاظت اولیه پودر واکنش دهنده استفاده شده است. لوله فولادی می‌تواند تا قبل از ذوب شدن، از مخلوط پودری واکنش نکرده داخل آن در برابر اکسیژن محافظت کند. در نتیجه احتمال واکنش تیتانیم با کربن و ایجاد کاربید تیتانیم افزایش می‌یابد.

در بررسی واکنش‌های محتمل همچنین باید به واکنشهای اکسیداسیون کربن نیز توجه کرد. همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، شیب تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش تولید CO_2 در رابطه با دما تقریبا ثابت است و با تغییرات دما، تغییر زیادی نمی‌کند. اما تغییرات انرژی آزاد گیبس مربوط به واکنش تولید CO با افزایش دما به سمت مقادیر منفی‌تر میل می‌کند. بنابر این اکسیژن در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰ کلوین تمایل بسیار شدیدی خواهد داشت که در ترکیب با کربن تولید CO کند. در این‌صورت کربن مورد نیاز برای واکنش با تیتانیم مصرف شده و احتمال ایجاد ذرات کاربید تیتانیم، کاهش می‌یابد. بنابر این محافظت از مخلوط پودری اولیه در زمان کامپوزیت سازی اهمیت زیادی دارد.

بررسی ریزساختار. شکل (۳) توزیع و اندازه ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم در نمونه های مختلف را با یکدیگر مقایسه نموده است. مشاهده می شود، توزیع ذرات کاربید تیتانیم در هر سه نمونه نسبتاً یکنواخت است. جدول (٤) نتایج حاصل از محاسبه متوسط کسر حجمی و متوسط اندازه ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم در این نمونه ها را نشان می‌دهد. مشاهده می شود که با افزایش نسبت گرافیت به تیتانیم در پودر اولیه، اندازه ذرات کاربید تیتانیم تولیدی بزرگتر شده و با کاهش این نسبت اندازه آنها کاهش یافته است. بیشترین میزان ذرات کاربید تیتانیم در نمونه ۳ با نسبت وزنی گرافیت به فروتیتانیم ۱۸ به ۸۲ مشاهده شد.

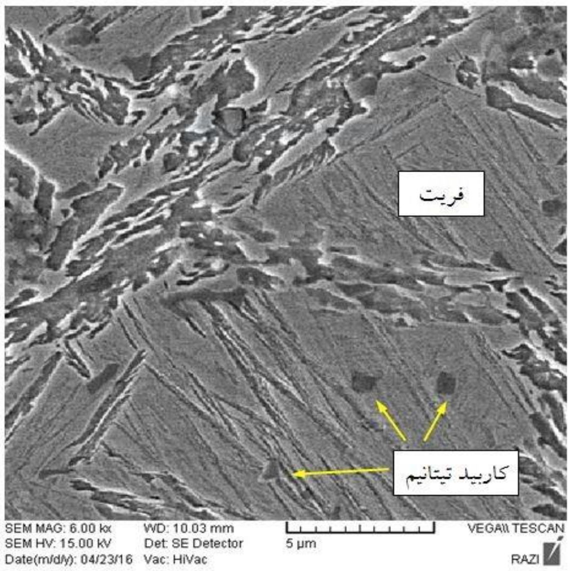


شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه ها با نسبت متفاوت عوامل واکنش دهنده، نقاط تیره کاربید تیتانیم، الف) نمونه شماره ۱ (C13 FeTi87) ، ب)نمونه شماره۲ (C15 FeTi85)،ج) نمونه شماره ۳ (C18 FeTi82)

جدول ٤ متوسط اندازه ذرات و کسر حجمی کاربید تیتانیم

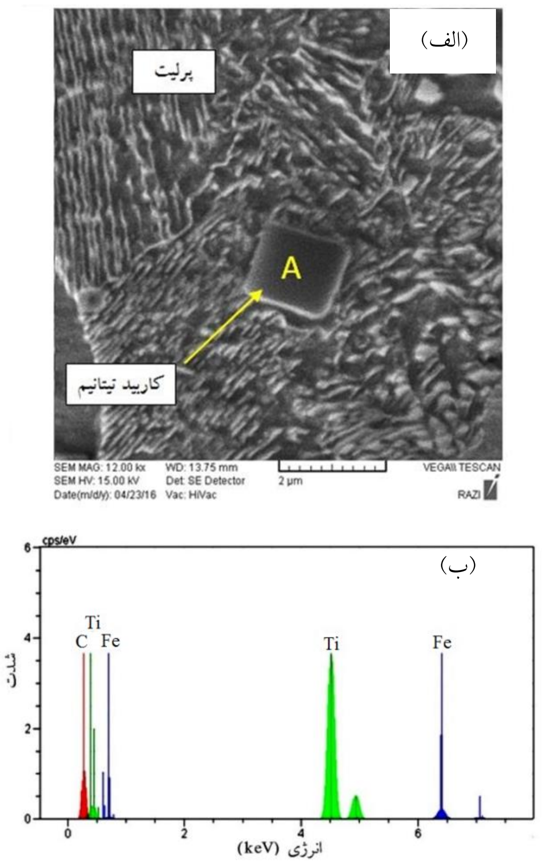
نمونه	نسبت وزنی فروتیتانیم/کربن	متوسط اندازه ذرات TiC (μm)	کسر حجمی ذرات TiC %
۱	۱۳/۸۷	۱/۱	۲/۵±۰/۱
۲	۱۵/۸۵	۳/٤	۵/٤±۰/۳
۳	۱۸/۸۲	٦/۷	۷/۳±۰/۳

شکل (٤) ذرات گوشه دار کاربید تیتانیم در نمونه ۱ را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه تمایل تیتانیم به تشکیل کاربید بسیار بیشتر از آهن است، تشکیل و رشد کاربید تیتانیم باعث کاهش کربن در اطراف ذرات شده و احتمال تشکیل فریت در اطراف ذرات بیشتر می‌گردد [15]. لذا در شکل (۵) دیده می‌شود، زمینه اطراف ذرات فریتی است.



شکل ٤ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات TiC در زمینه فریتی در نمونه ۱

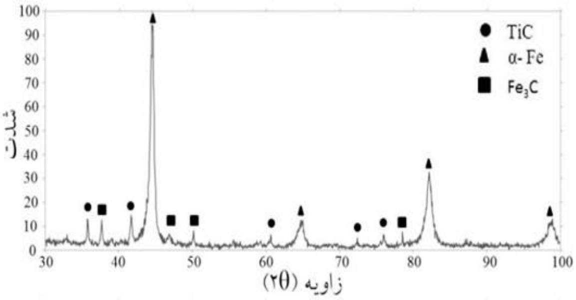
شکل (۵-الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی یک ذره کاربید تیتانیم در زمینه پرلیتی مربوط به نمونه ۳ را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقدار کربن در پودر اولیه در این نمونه نسبت به نمونه ۱ افزایش پیدا کرده است، می‌توان در نظر گرفت که بعد از تشکیل کاربید تیتانیم، کربن باقی مانده صرف ایجاد پرلیت می‌گردد. لذا زمینه در این نمونه تمایل به پرلیتی شدن خواهد داشت. مورفولوژی مکعبی این ذرات را می‌توان به ساختار شبکه مکعبی کاربید تیتانیم نسبت داد. شکل (۵- ب) ترکیب شیمیایی ذره کاربید تیتانیم را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، این ذره دارای عناصر تیتانیم، کربن بوده و آهن نیز به دلیل زمینه فولادی در نتایج دیده می‌شود.



شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه ۳، الف) ذره TiC در زمینه پرلیتی، ب) آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس نقطه A

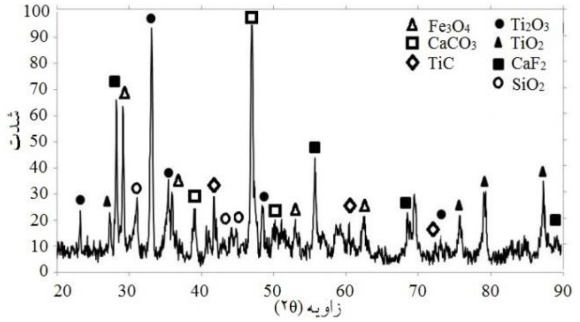
بررسی یافته‌های پراش پرتو ایکس. شکل (٦) الگوی پراش پرتو ایکس نمونه ۳ را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، فازهای موجود در این نمونه شامل کاربید تیتانیم (TiC)، فریت (α-Fe) و سمنتیت (Fe_3C) است. همچنین اثری از فازهای موجود در پودر اولیه شامل فروتیتانیم(Fe_2Ti و FeTi) و گرافیت دراین نمونه نیست.

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نزدیک به تمام فروتیتانیم موجود در مخلوط پودری اولیه در واکنش با کربن شرکت کرده و فاز تقویت کننده کاربید تیتانیم را تولید نموده است. گزارش شده است که، با کاهش تیتانیم در حوضچه جوش در اثر تولید کاربید تیتانیم، کربن نمی‌تواند بطور کامل با تیتانیم واکنش کرده، درنتیجه کربن تمایل خواهد داشت با آهن واکنش و Fe_3C ایجاد کند [16]. بنابر این حضور خطوط پراش مربوط به سمنتیت (Fe_3C) در الگوی پراش پوشش تولیدی می‌تواند ناشی از این امر باشد.



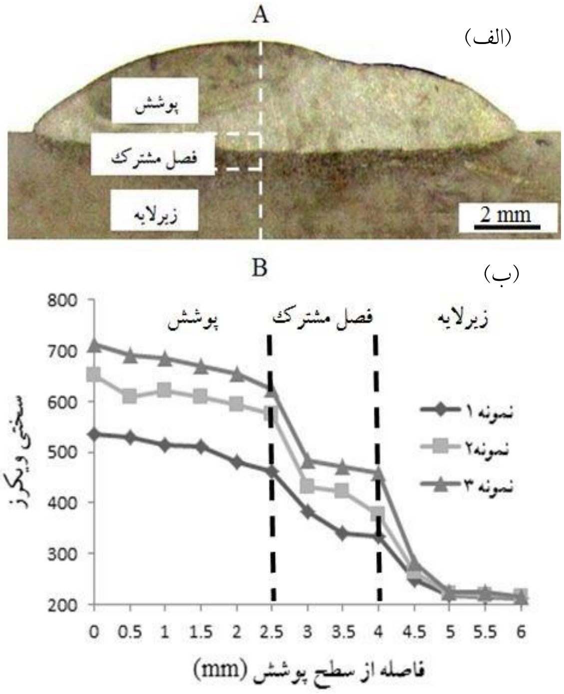
شکل ٦ الگوی پراش پرتو ایکس از پوشش نمونه ۳

در شکل (۷) الگوی پراش پرتو ایکس از سرباره حاصل از جوشکاری نمونه ۳ نشان داده شده است. فازهای موجود در سرباره شامل فازهای موجود در الکترود اولیه شامل اکسیدهای تیتانیم، کربنات کلسیم، سیلیس، اکسید آهن حاصل از اکسید شدن آهن در زمان جوشکاری و کاربید تیتانیم است.گزارش شده است که با توجه به وزن مخصوص کمتر کاربید تیتانیم (g/cm^3 ٤/۹۳ – ٤/۹۰) در مقایسه با فولاد مذاب مقدار زیادی از کاربید تیتانیم به سطح حوضچه جوش پس زده می‌شود [16]. بنابر این احتمال ورود ذرات کاربید تیتانیم به سرباره افزایش می‌یابد. پس زدن ذرات کاربید تیتانیم توسط جبهه انجماد را می‌توان عامل دیگری در وجود این ذرات در سرباره دانست. همچنین اکسید تیتانیم موجود در سرباره را می‌توان به اکسید تیتانیم موجود در پوشش الکترود و اکسید شدن مقداری از تیتانیم موجود در فروتیتانیم تشکیل دهنده مخلوط پودری اولیه نسبت داد.



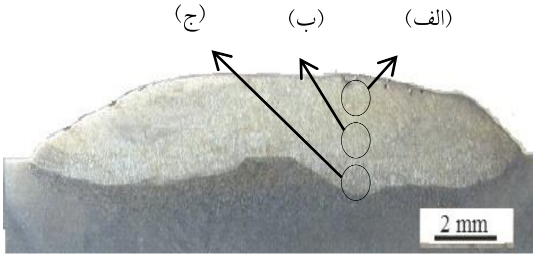
شکل ۷ الگوی پراش پرتو ایکس از سرباره نمونه ۳

سختی. شکل (۸ – الف) تصویر ماکرو سکوپی نمونه ۳ را نشان می‌دهد. نتایج ریز سختی سنجی پوشش تولید شده در طول خط (A-B) در شکل (۸- ب) نشان داده شده است. می‌توان دید که سختی سطحی با افزایش ذرات کاربید تیتانیم افزایش پیدا کرده است. کمترین سختی سطحی در نمونه ۱ با نسبت وزنی گرافیت به فرو تیتانیم (۱۳ به ۸۷) در مخلوط پودری اولیه مشاهده گردید. در این نمونه به علت اندازه کوچک ذرات کاربید تیتانیم و کسر حجمی کم آنها در پوشش تولیدی، افزایش سختی کمتری مشاهده شد. بیشترین سختی سطحی در نمونه ۳ مشاهده شد. در این نمونه، سختی پوشش تولیدی در مقایسه با زیرلایه تقویت نشده تا ۲۲۰٪ افزایش پیدا کرده واز ۲۲۰ ویکرز به ۷۱۲ ویکرز رسیده است. همانطور که در قسمت بررسی ریز ساختار نشان داده شد، افزایش نسبت وزنی گرافیت به فرو تیتانیم (۱۸به۸۲) در نمونه ۳ باعث افزایش کسر حجمی و اندازه ذرات فاز سخت کاربید تیتانیم می‌گردد. می‌توان دید که با افزایش اندازه و کسر حجمی ذرات سخت کاربید تیتانیم در این نمونه، سختی نیز افزایش یافته است. این رفتار در کامپوزیت‌های سطحی تولید شده با استفاده از فرایند لیزر نیز گزارش شده است[6,11]. تغییر نوع زمینه از فریتی در نمونه ۱ به پرلیتی در نمونه ۳ با افزایش مقدار کربن در مخلوط پودری اولیه را می‌توان عامل موثر دیگری د افزایش سختی در نمونه ۳ دانست.

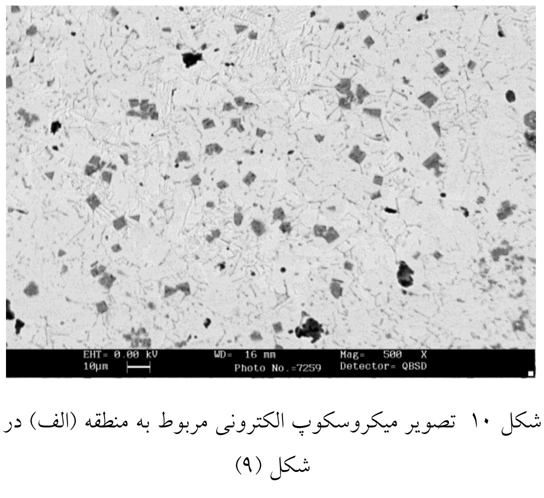


شکل ۸ (الف) تصویر ماکروسکوپی پوشش تولید شده، (ب) نتایج ریزسختی نمونه ها در طول خط (A-B)

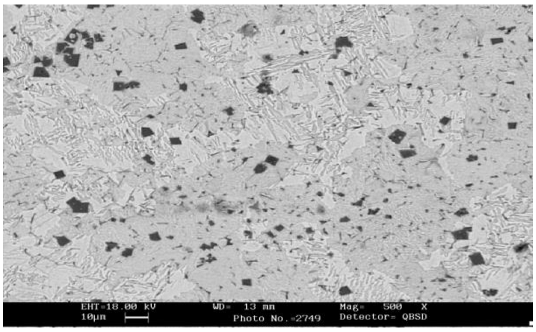
همانطور که در شکل (۸- ب) نشان داده شده با افزایش فاصله از سطح پوشش، سختی به تدریج کاهش می‌یابد. می توان این پدیده را به کاهش مقدار ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم از سطح به عمق پوشش به دلیل تمایل تجمع ذرات کاربید تیتانیم در مناطق سطحی پوشش نسبت داد. در مراجع مختلف مقدار چگالی کاربید تیتانیم g/cm^3 ٤/۹۳ – ٤/۹۰ و فولاد کربن متوسط g/cm^3 ۷/۱ گزارش شده است[4,16,17]. با توجه به داده های فوق، تفاوت زیاد چگالی کاربید تیتانیم نسبت به فولاد مذاب را می‌توان عامل این نوع رفتار دانست [3]. در شکل (۹) مناطق مختلف پوشش شامل نواحی نزدیک به سطح پوشش، نواحی میانی و نواحی نزدیک فلز پایه در نمونه ۳ نشان داده شده است. شکل های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) تصاویر میکروسکوپی مربوط به این مناطق را نشان می دهد. دقت در این تصاویر آشکار می سازد، با دور شدن از فصل مشترک فلزپایه و پوشش و نزدیک شدن به نواحی سطحی پوشش، تجمع بیشتری از ذرات کاربید تیتانیم مشاهده می‌شود. همانطور که شکل های (۱۰) و (۱۱) نشان می‌دهند با حرکت از سطح به سمت عمق پوشش، مقدار ذرات تقویت کننده وارد شده کاهش می‌یابد. این نوع توزیع ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم در کامپوزیت درجا تولید شده توسط فرایند جوشکاری قوسی تنگستنی با گاز محافظ (GTAW) توسط محققان دیگر نیز گزارش شده است[4,16]. شکل (۱۲) مناطق نزدیک به فلز پایه را نشان می‌دهد. می‌توان دید که در فصل مشترک بر خلاف پوشش، سختی به یکباره کاهش یافته است. این رفتار را می‌توان به عدم حضور ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم در فصل‌مشترک نسبت داد. با این حال با توجه به اینکه در زمان جوشکاری این منطقه دچار تغییرات شدید ساختاری می‌گردد، سختی آن نسبت به زیرلایه بیشتر است. می‌توان دید که در زیرلایه سختی به شدت افت می‌کند. این رفتار نشان دهنده عدم تغییرات ساختاری در این قسمت است.



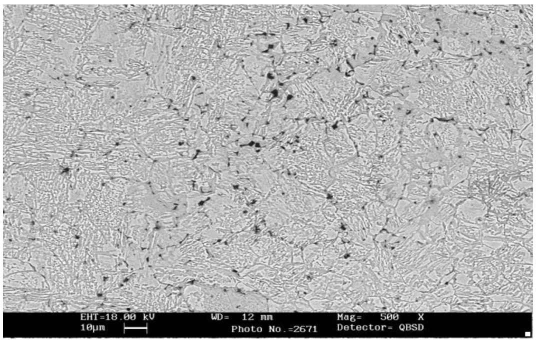
شکل ۹ مناطق مختلف پوشش در نمونه ۳، (الف) مناطق سطحی (ب) مناطق میانی، (ج) مناطق نزدیک به فصل مشترک



شکل ۱۰ تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به منطقه (الف) در شکل (۹)



شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به منطقه (ب) در شکل (۹)



شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به منطقه ج در شکل (۹)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش لایه کامپوزیتی Fe/TiC با استفاده از فرایند جوشکاری با الکترود پوشش‌دار بر سطح فولاد AISI 1045 ایجاد شد، نتایج حاصل را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد.

۱. امکان ایجاد کامپوزیت زمینه فولادی با ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم طی فرایند جوشکاری قوسی الکترود پوشش‌دار با استفاده از مخلوط پودری فروتیتانیم و گرافیت از نظر ترمودینامیک وجود دارد.
۲. بیشترین اندازه و نسبت حجمی ذرات تقویت کننده کاربید تیتانیم در نمونه با نسبت وزنی گرافیت به فرو تیتانیم (۱۸ به ۸۲) بدست آمد.
۳. بیشترین سختی در نمونه با نسبت وزنی گرافیت به فرو تیتانیم (۱۸ به ۸۲) بدست آمد.
٤. سختی کامپوزیت تولید شده تا ۲۲۰٪ نسبت به زیرلایه تقویت نشده (۲۲۰ به ۷۱۲ ویکرز) افزایش پیدا کرد.

مراجع

1. Xinhong W., Zengda Z., Sili S., Shiyao Q., "Microstructure and wear properties of in situ TiC/FeCrBSi composite coating prepared by gas tungsten arc welding ", *Wear*, Vol. 260, pp. 25-29, (2006).
2. Peng D.X., "The effects of welding parameters on wear performance of clad layer with TiC ceramic", *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 64, No. 5, pp. 303-311, (2012).
3. Tjong S.C., Ma Z.Y., "Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites", *Materials Science and Engineering*, Vol.29, pp. 49-113, (2000).
4. Wang X.H., Song S.L., Zou Z.D., Qu S.Y., "Fabricating TiC particles reinforced Fe-based composite coatings produced by GTAW multi-layers melting process", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 441, pp. 60-67, (2006).
5. Lee J., Euh K., Cheol Oh J., Lee S., "Microstructure and hardness improvement of TiC/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 323, pp. 251-259, (2002).
6. Emamian A., Corbin S.F., Khajepour A., "Tribology characteristics of in-situ laser deposition of Fe-Tic", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 206, pp. 4495-4501, (2012).
7. Kubaschewski O., Alcock C.B., "Metallurgical Thermochemistry" Pergamon Press, 5th edition, (1979).

۸. صدر نژاد خ.ا.، "حرارت و حرکت در مواد " انتشارات وزارت امور خارجه، تهران، (۱۳۷۸).

9. Agarwal A, Dahotre N.B., " Pulsed Electrode surfacing of steel with TiC coating microstructure and Wear Properties", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 8, No. 4, pp. 479-486, (1999).

۱۰. سعیدی، ع.، " مقدمه ای بر ترمودینامیک مواد" جلد اول، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد دانشگاه صنعتی اصفهان، چاپ نهم (۱۳۹۲).

11. Du B., Wang X., Zou Z., "Microstructure and tribological behavior of laser in situ synthesized TiC-reinforced fe-based composite coatings", *Tribology Letters*, Vol. 43 pp. 295-301, (2011).

12. Zhu Z., Dong K., Wang H., Huang J., Li J., Xie Z., "Reaction mechanisms of the TiC/Fe composite fabricated by exothermic dispersion from Fe–Ti–C element system", *Powder Technology*, Vol. 246, pp. 456-461, (2013).

13. Wang X.H., Zhang M., Zou Z., Qu S.Y., "Microstructure and wear properties of TiC–VC Reinforced iron based hardfacing layers", *Materials Science and Technology*, Vol. 22, pp 193-198, (2006).

14. Wang X.H., Zou Z.D., Qu S.Y., Song S.L., "Microstructure and properties of the TiC/Fe-based alloy hardfacing layers, *Journal of Materials Science*, Vol. 40, pp. 3629-3633, (2005).

15. Wu Q., Sun Y., Yang C., Xue F., Song F., "Microstructure and mechanical properties of common straight carbon steels strengthened by TiC dispersion", *Materials Transactions*, Vol. 47, pp. 2393-2398, (2006).

16. Wang X.H., Song S.L., Qu S.Y., Zou Z.D., "Characterization of in situ synthesized TiC particle reinforced Fe-based composite coatings produced by multi-pass overlapping GTAW melting process", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 5899-5905, (2007).

17. Jimbo I., Cramb A.W., "The density of liquid iron-carbon alloys", *Metallurgical Transactions B*, Vol. 24, pp. 5-10, (1992).